

# **IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS DE CONTROL INTELIGENTE EN UN HELICÓPTERO NO TRIPULADO DE DOS GRADOS DE LIBERTAD**

**MARIANA LÓPEZ RIVERA**



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA  
2020**

**IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS DE CONTROL  
INTELIGENTE EN UN HELICÓPTERO NO TRIPULADO DE  
DOS GRADOS DE LIBERTAD**

**MARIANA LÓPEZ RIVERA**

*Tesis presentada como requisito parcial para obtener el título de:*  
**INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**DIRECTOR:**  
**EDUARDO GIRALDO SUÁREZ, PhD**

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN:**  
**CONTROL AUTOMÁTICO**



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA**  
**INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**  
**2020**

# Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

Jurado

---

Jurado

---

Jurado

Pereira, 2020.

---

## **Agradecimientos**

---

En primera estancia me gustaría agradecer al semillero y grupo de investigación en Control Automático de la Universidad Tecnológica de Pereira, por que gracias a los proyectos y trabajos de investigación en los cuales he participado, he conseguido los conocimientos suficientes para realizar todo este trabajo de investigación. En segunda estancia, me gustaría agradecer a la Universidad quien me ha permitido trabajar en el laboratorio de control automático y usar sus diferentes instalaciones para realizar todo el trabajo de campo y trabajo académico necesario en este proyecto.

---

## Justificación

---

Los vehículos aéreos no tripulados, y entre ellos, los helicópteros no tripulados a pequeña escala, son sistemas dinámicos de gran interés para la comunidad académica y científica, debido a su multiplicidad de usos; desde aplicaciones civiles en transporte de mercancías, agricultura, vigilancia e inspección de edificios o zonas de desastre; hasta aplicaciones militares de seguridad, rastreo y ataque. [1, 2, 3, 4, 5].

Despiertan un gran interés desde el punto de vista de su operación, puesto que se ven involucradas tecnologías de telemetría y mando remoto [6], y, por su puesto, la teoría de control, que debe superar la gran influencia de los efectos aerodinámicos, un alto grado de interacción entre las variables internas y las características no lineales en su comportamiento, que sumadas, hacen del control de estos sistemas, todo un reto desde el punto de vista de la ingeniería moderna [7, 8].

Los controladores clásicos, como los PI o PID, o el control por retroalimentación de estados, han demostrado ser ineficientes y poco precisos a la hora de manipular este tipo de sistemas [9]. Por consiguiente la investigación y el desarrollo de sistemas de control más robustos se ha convertido en un importante eje de desarrollo que promete revolucionar el campo de los vehículos aéreos no tripulados. En este aspecto, entre las técnicas vanguardistas y como esta demostrado en [10, 11, 12], el control inteligente ha probado ser una opción a la medida de estos sistemas dinámicos. Investigar la implementación de estas novedosas estrategias de control en los sistemas de vuelo no tripulados, es la motivación principal de este proyecto de investigación.

---

## Objetivos

---

### Objetivo General

Diseñar un sistema de control inteligente para un vehículo aéreo no tripulado de dos grados de libertad.

### Objetivos específicos.

- Investigar la aplicabilidad y funcionamiento de los diferentes tipos de control inteligente y control PID para su implementación en el sistema.
- Analizar el comportamiento y las dinámicas internas que rigen el funcionamiento de la planta (Helicóptero de dos grados de libertad).
- Diseñar y simular el comportamiento del control PID y el control inteligente comparando los resultados obtenidos.

---

## Índice general

---

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Marco de referencia</b>	<b>3</b>
2.1. Marco Conceptual . . . . .	3
2.2. Marco Histórico . . . . .	6
2.2.1. Panorama Actual . . . . .	7
<b>3. Helicóptero no tripulado de dos grados de libertad</b>	<b>8</b>
3.1. Descripción física del helicóptero . . . . .	8
3.2. Modelo matemático del helicóptero . . . . .	9
3.3. Simulación del comportamiento del sistema en lazo abierto . . . . .	12
<b>4. Métodos de control para un helicóptero de dos grados de libertad</b>	<b>15</b>
4.1. Generalidades del Control para sistemas MIMO . . . . .	15
4.2. Control PID Acoplado-Desacoplado . . . . .	15
4.3. Control Inteligente . . . . .	16
4.3.1. Redes neuronales por Modelo NARMA-L2 . . . . .	16
<b>5. Marco Experimental</b>	<b>19</b>
5.1. Detalles del controlador para el rotor principal . . . . .	19
5.2. Detalles del controlador para el rotor de cola . . . . .	21
<b>6. Resultados</b>	<b>23</b>
6.1. Resultados Controlador PID . . . . .	23
6.1.1. Control PID en el Rotor Principal . . . . .	23
6.1.2. Control PID en el Rotor de Cola . . . . .	23
6.2. Resultados Control Inteligente: NARMA-L2 . . . . .	25
6.2.1. Rotor Principal . . . . .	25
6.2.2. Rotor de Cola . . . . .	26
6.3. Comparación de resultados . . . . .	28

6.3.1. Rotor Principal . . . . .	30
6.3.2. Rotor de Cola . . . . .	30
<b>7. Conclusiones</b>	<b>31</b>
<b>8. Recomendaciones</b>	<b>32</b>
8.1. Uso de bloque de control . . . . .	32
8.2. Motores de búsqueda . . . . .	32
8.3. Coste computacional . . . . .	32
<b>9. Presupuesto</b>	<b>33</b>



---

## Índice de figuras

---

2.1. Controlador PID clásico [13]. . . . .	4
2.2. Esquema de una red neuronal de tres capas [14] . . . . .	5
2.3. Panorama mundial de investigación en Control inteligente . . . . .	7
3.1. Helicóptero no tripulado de dos grados de libertad (Sistema real) . . . . .	9
3.2. Modelo Matemático (Planta) . . . . .	10
3.3. Simulación del sistema en lazo abierto . . . . .	13
3.4. Respuesta rotor principal a un STEP . . . . .	13
3.5. Respuesta rotor de cola a un STEP . . . . .	14
4.1. Simulación del controlador PID en la planta . . . . .	16
4.2. Diagrama de control NARMA-L2 para el rotor principal . . . . .	17
4.3. Diagrama de control NARMA-L2 para el rotor de cola . . . . .	18
5.1. Parámetros configurados en el controlador del rotor principal . . . . .	20
5.2. Parámetros configurados en el controlador del rotor de cola . . . . .	21
6.1. Respuesta controlador PID en el rotor principal[15] . . . . .	24
6.2. Respuesta controlador PID en el rotor de cola [15] . . . . .	24
6.3. Generación de datos de entrenamiento - Rotor Principal . . . . .	26
6.4. Entrenamiento de la red Neuronal - Rotor Principal . . . . .	27
6.5. Resultado Final Control inteligente del Rotor Principal . . . . .	27
6.6. Generación de datos de entrenamiento - Rotor de Cola . . . . .	28
6.7. Entrenamiento de la red Neuronal - Rotor de Cola . . . . .	29
6.8. Resultado Final Control inteligente del Rotor de Cola . . . . .	29
9.1. Presupuesto . . . . .	34



# CAPÍTULO 1

---

## Introducción

---

Desde usos en el sector de defensa y seguridad [16, 17], pasando por la vigilancia en ciudades o locaciones poco accesibles, [18] [1], a aplicaciones en la industria agrícola, con sistemas de monitoreo y aspersión aérea [19, 20], los vehículos aéreos no tripulados, por sus siglas en español (VANT), han despertado el interés de muchas áreas del desarrollo tecnológico por su versatilidad a la hora de efectuar labores que de otra forma requerirían más tiempo y esfuerzo. [21] En este aspecto la comunidad científica se ha enfocado en resolver las dificultades en su implementación, desde los primeros desarrollos más de un siglo atrás, [22, 23]. Considerados como sistemas de gran complejidad, debido al alto grado de interacción de sus variables y a la constante presencia de perturbaciones externas, se ha hecho necesaria la investigación en controladores más robustos y confiables, que garanticen la estabilidad de vuelo y el seguimiento de las referencia de posición, aún frente a perturbaciones fuertes, como cambios en la velocidad y dirección del viento, o cambios en la presión atmosférica.

Entre estos sistemas no tripulados, resalta el helicóptero de dos grados de libertad, que presenta la configuración de menor cantidad de motores que puede proporcionar un vuelo estable (2), que lo hace, en términos de consumo de energía, más eficiente frente a los *drones* convencionales, en sacrificio de la estabilidad en el vuelo [24]. En términos generales, es una planta multivariable, no-lineal, con actuadores (motores AC o DC) susceptibles a los cambios bruscos en la señal de control. Las estrategias tradicionales para abordar su operación, como el control PI o PID, requieren de la linealización del sistema, para llevar su control a puntos de operación específicos; esto suele entrar en conflicto con la naturaleza no lineal del helicóptero y con las perturbaciones ya mencionadas, lo que lleva a resultados oscilatorios, ineficientes y poco prácticos.

En la vanguardia del control moderno, nuevos método comienzan a tener más relevancia debido a las ventajas comparativas que tienen contra el control clásico, entre estos métodos resaltan los algoritmos de control inteligente; herramientas que utilizan el conocimiento previo de los sistemas físicos para proponer controladores capaces de *aprender*

las características de operación de la planta y responder, cada vez con más precisión, ante los cambios de referencia y las perturbaciones. Entre las técnicas de control inteligente más estudiadas están las redes neuronales, el control difuso y neuro-difuso, los algoritmos genéticos y el control experto, [25, 26], todas con gran potencial de aplicación en los helicópteros de dos grados de libertad.

Este documento busca presentar los resultados de la investigación en el campo del control inteligente aplicado a los VANT, en específico, al helicóptero de dos grados de libertad, comparando los resultados con un control PID clásico. Los temas necesarios para abordar la investigación y sus resultados se presentan de la siguiente manera.

El capítulo 2 presenta la terminología técnica y académica necesaria para comprender los diferentes aspectos de la investigación y la revisión histórica en el campo del control inteligente. El capítulo 3 explora las características dinámicas del helicóptero de dos grados de libertad, hace un acercamiento a su modelado y a las complejidades en su control. En el capítulo 4 se desarrolla la formulación matemática y experimental de las leyes de control clásico e inteligente que se aplican al modelo descrito en el capítulo 3 y son el objeto de la investigación de este documento. Finalmente, los capítulos 5, 6 y 7 presentan el marco experimental, los resultados de simulación de los controladores propuestos y las conclusiones alcanzadas al realizar un análisis sobre los mismos.

## CAPÍTULO 2

---

### Marco de referencia

---

#### 2.1. Marco Conceptual

Para dar claridad sobre la investigación, se deben tener presentes algunos conceptos claves a la hora de diseñar o implementar cualquiera sistema de control; entendiéndose como *sistema de control*, cualquier sistema capaz de influir en el comportamiento de otro sistema de tal forma que se pueda obtener un resultado deseado.

**Sistema físico dinámico:** Cualquier proceso natural que involucra la interacción entre variables conocidas como posición, velocidad y aceleración; carga, corriente y flujo eléctrico, etc. Estos sistemas pueden ser objeto de modelos matemáticos mediante el uso de las leyes establecidas por las disciplinas científicas; cada uno de los modelos puede clasificarse según su comportamiento: lineal o no lineal; por el número de entradas y salidas que presentan en: SISO (una entrada una salida) a MIMO (Múltiples entradas y múltiples salidas); por su variabilidad: variantes o invariantes en el tiempo; entre otros.

**Vehículo aéreo no tripulado (VANT):** UAV (del inglés “unmanned aerial vehicle”) o comúnmente Dron. Es una aeronave sin tripulación, reutilizable, capaz de mantener de manera autónoma un nivel de vuelo controlado y sostenido, y propulsado por un motor de explosión, eléctrico o de reacción [27]. Con la progresiva popularización del uso civil de los drones sus aplicaciones varían, ampliándose el número de consumidores más allá del terreno militar.

**Función de transferencia:** En ingeniería, se describe la función de transferencia de un sistema dinámico invariante en el tiempo, como la representación matemática de la relación entre su *entrada*  $u(t)$  y su *salida*  $y(t)$ . Siendo un modelo teórico del sistema físico, su cálculo aporta información fundamental sobre el comportamiento de la planta y es necesario para la aplicación de muchas de las ramas de la teoría de control, [28, 29, 30].

**Teoría de control:** En la ciencia moderna, se describe la teoría del control, como la integración interdisciplinaria entre las matemáticas y la ingeniería, que busca desarrollar,

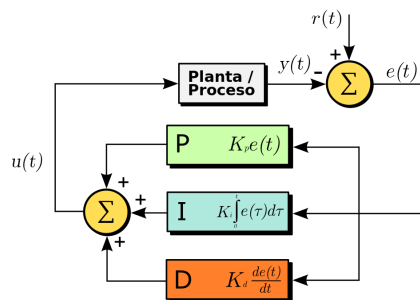


Figura 2.1: Controlador PID clásico [13].

técnicas y metodologías para modificar a voluntad el comportamiento de los sistemas dinámicos desarrollados por el hombre; con el fin de reducir las probabilidades de fallo y obtener resultados de funcionamiento deseados, [31, 32].

**Control clásico:** La teoría de control clásico involucra los conceptos del control análogo y digital, que analizan el comportamiento de los sistemas dinámicos desde el estudio de su función de su transferencia, y que lo modifican según criterios definidos, mediante una lazo de realimentación de la salida  $y(t)$ , el calculo del error  $e(t)$  con respecto a una referencia deseada  $r(t)$ , con intervención de tres acciones básicas ampliamente estudiadas y utilizadas en industria: Acción proporcional al error ( $P$ ), acción integral al error ( $I$ ), y acción derivativa del error ( $D$ ), [33]. La figura 2.1 muestra el diagrama de bloques de un controlador clásico.

La acción proporcional  $Kp$  aumenta la rapidez de la respuesta y actúa solo en el transitorio, ya que al final la acción integral  $Ki$  elimina el error de estados estacionario. LA acción derivativa  $Kd$  actúa para mejorar la estabilidad.

**Control inteligente:** El control inteligente es una rama de la ingeniería de control que propone modelos no convencionales de controladores, basados en reglas de interacción definidas por el usuario (Control por lógica difusa), algoritmos de aprendizaje de máquina (Control por redes neuronales) y sistemas de identificación capaces de adaptarse de forma autónoma a las variaciones presentes en un sistema físico (Control adaptativo), entre otros. Nace con la motivación de proponer controladores más robustos y que en sinergia con los algoritmos computacionales, faciliten la implementación de controladores sobre sistemas de alta complejidad, [25, 34].

**Redes Neuronales:** Las redes neuronales son un modelo computacional de toma de decisiones inspirado en la forma como se comportan las neuronas de un cerebro. Se componen de un cantidad determinada de entidades individuales conocidas como *neuronas artificiales*, que están interconectadas entre sí por enlaces lógicos y se diferencian entre sí por capas encargadas de tareas específicas. La información a la entrada de la red neuronal atraviesa cada capa, sometida a adiciones, restricciones o pesos configurados por el usuario, produciendo valores de salida que se evalúan mediante una función de costo para determinar si el comportamiento es adecuado o se deben hacer ajustes a las neuronas. Este

procedimiento de ajuste, modifica de forma autónoma las características de cada neurona, produciendo una comportamiento de *aprendizaje* que le permite al sistema entrenarse para realizar mejor la tarea en cuestión. [35]

Esta característica garantiza que los controladores con redes neuronales, sobresalgan en campos donde las soluciones son complejas o difíciles de definir a partir de los algoritmos de control convencionales, [34]. La figura 2.2 muestra la representación gráfica de una red neuronal.

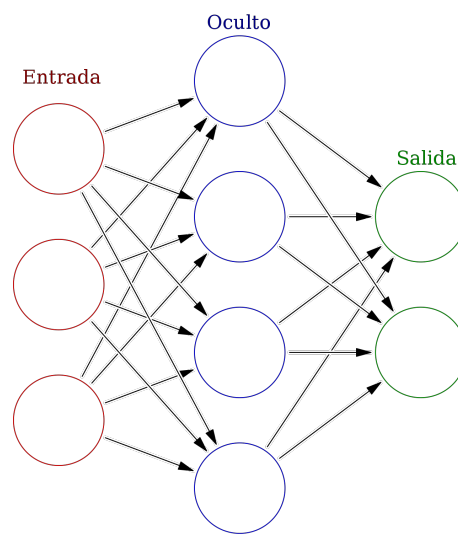


Figura 2.2: Esquema de una red neuronal de tres capas [14]

**Neurocontrolador por modelo de referencia:** Este tipo de arquitectura de red neuronal, utiliza dos tipos de entrenamiento, el primero para el controlador y el segundo para la identificación del sistema o planta, la combinación del resultado de ambos entrenamiento mejora el desempeño del controlador [36].

**Neurocontrolador predictivo:** En este caso, se puede hablar de un control por predicción en base datos obtenidos previamente del comportamiento del sistema. Esto se logra gracias a que la red neuronal realiza primero la identificación, y en base a estos resultados propone un modelo de anticipación que *predice* su comportamiento futuro.

**Neurocontrolador NARMA-L2:** El neurocontrolador descrito en esta sección recibe dos nombres diferentes: control de linealización por retroalimentación y control NARMA-L2 [37]. Este tipo de controlador busca cancelar las no linealidades del sistema convirtiendolo en un modelo lineal. En este proceso se realiza la identificación de la planta, para luego llegar al entrenamiento de la red neuronal.

## 2.2. Marco Histórico

El concepto de control inteligente, como se menciona en la sección anterior, parte de unir las definiciones de *sistemas de control* y *sistemas inteligentes*, ambos, importantes ejes de desarrollo en los que se sigue investigando actualmente. Es un campo complejo de la ingeniería del control, de gran desarrollo y también con un gran potencial por explorar. En sus inicios se concibió como la sinergia entre los sistemas de control computarizados y la teoría de inteligencia artificial, al final de los años 70, cuando los conocimientos técnicos y teóricos necesarios estuvieron disponibles [25]

Históricamente se han propuesto cuatro técnicas que componen el control inteligente: control experto, control por lógica difusa, control por redes neuronales y control por algoritmos genéticos. Cada uno, hace uso de diferentes técnicas computacionales avanzadas, para efectuar la toma de decisiones que permite manipular a voluntad el comportamiento de los sistemas dinámicos.

Es necesario destacar como precursor y gran impulsor del control inteligente a Lotfi Zadeh, quién en 1965 propuso la función de pertenencia y los conjuntos difusos, bases de todas las técnicas de control inteligente, e introdujo un nuevo valor lingüístico para la toma de decisiones, replanteando el esquema de control clásico, [38, 39].

Uno de los más importantes precursores fué King-Sun Fu por sus trabajos con *Recognition in the loop* publicados en 1971, que permitieron el reconocimiento de patrones y lo que hoy conocemos como *Machine Learning* [40].

En 1982 Feigenbaum, introdujo la primera definición de control experto [41]. Este tipo de modelo procesa la información por medio de diferentes normas, establecidas a partir del comportamiento del sistema. Estas normas se activan a partir de la culminación de una acción específica y se ordenan de forma escalonada para guiar a la salida a su valor deseado, por lo que a mayor cantidad de normas más eficaz será el controlador.

En cuanto al control por lógica difusa, resaltan los trabajos de Saridis, Meystel, y el de Tzafestas. En 1989 proponen la aplicación de un control que estima valores de salida a partir de reglas que asignan *pesos* a la entrada, dando prioridad o penalizando cierto tipo de resultados. [42].

El control por redes neuronales surge como un intento para emular el funcionamiento de las neuronas en el cerebro humano. Utiliza las herramientas informáticas para crear una red de nodos, que procesan una entrada a partir de reglas preestablecidas; cuyo desempeño se evalúa por medio de una función de costo que modifica de forma automática el valor de las reglas. Sucesivas iteraciones del mismo proceso, permiten que el control mejore paulatinamente su respuesta. [43].

En 1970, los algoritmos genéticos surgen como rama de la inteligencia artificial, como propuesta de John Henry Holland [44]. Son llamados así porque se inspiran en la evolución biológica y su base genética. Su dinámica consiste en crear de forma aleatoria individuos (que pueden ser las ganancias de un controlador), y evaluar su desempeño; los individuos con mejor desempeño son recuperados y se agregan mutaciones (modifica-



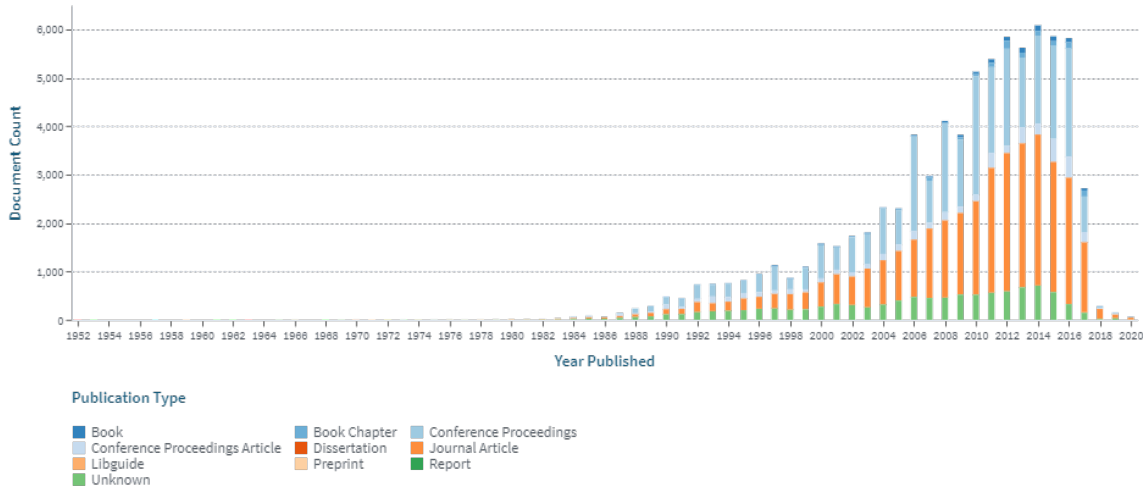


Figura 2.3: Panorama mundial de investigación en Control inteligente

ciones arbitrarias) y cruces (combinaciones de individuos) para, seleccionar y reproducir siempre el mejor desempeño en cada generación, esto a lo largo de un número determinado de iteraciones arroja siempre el mejor resultado.

### 2.2.1. Panorama Actual

El panorama en el campo de control inteligente muestra como el año más activo fue al 2014, donde se presentaron un 30 – 40 % de trabajos de investigación en el campo (Ver Fig.2.3). Además de esto es necesario resaltar como los países que reflejan el mayor porcentaje de investigación referente son China, Estados Unidos, Canadá y España.

En los últimos años, se han dado grandes avances en la implementación de controladores inteligentes. Las cada vez más poderosas herramientas de cómputo permite poner a prueba el verdadero desempeño de los algoritmos más robustos, así hay variadas incursiones en la investigación y puesta en operación de controladores inteligentes en el campo de la producción energía eólica [45] y en los sistemas de generación y distribución de potencia eléctrica [46], en la manipulación de sistemas de refrigeración, calefacción y aire acondicionado de gran eficiencia [47] y una gran cantidad de desarrollos adicionales [48].

## CAPÍTULO 3

---

### Helicóptero no tripulado de dos grados de libertad

---

#### 3.1. Descripción física del helicóptero

Un helicóptero de dos grados de libertad es un mecanismo que consta de un cuerpo o estructura que está sujeta a una base central, sobre la cual se generan dos movimientos angulares, uno sobre el eje  $w$  llamado  $\omega$  y el otro sobre el eje  $x$  llamado  $\theta$ . En cada extremo del cuerpo del helicóptero se encuentra un motor DC de 9V con una hélice acoplada, los cuales son los encargados de generar el torque necesario para mover el sistema. Basados en los modelos de los helicópteros distribuidos por las empresas Feedback-Instruments [49] y Quanser [50], se crea el siguiente diseño mostrado en la Fig. 3.1. Con excepción de los motores, las hélices y sus soportes, los componentes restantes fueron mecanizados mediante un proceso de arranque de viruta y galvanizados con el fin de evitar el óxido en el caso de la base principal y los ejes, las partes restantes no pasaron por este acabado debido a que fueron hechas en aluminio. La silueta que está fabricada en acrílico, fue dibujada usando una cortadora láser.

Este mecanismo cuenta con unos contrapesos que permiten estabilizar la posición angular de la cabeza del helicóptero en un punto de operación cero, sin interferir con el funcionamiento de las demás variables, cuenta con una base de 20 cm que brinda estabilidad y equilibrio, además evita golpes entre el helicóptero y la superficie, también cuenta con un pivote ubicado en el centro de la planta donde se acoplan los ejes sobre los cuales se producen los movimientos angulares[9]. Por último, para la lectura de movimientos se utiliza una MPU6050, que cuenta con acelerómetro y giroscopio. Para el procesamiento de datos, se utiliza un Arduino UNO.

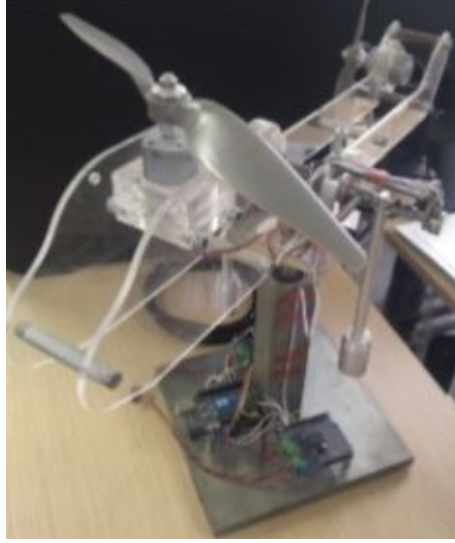


Figura 3.1: Helicóptero no tripulado de dos grados de libertad (Sistema real)

### 3.2. Modelo matemático del helicóptero

El modelo matemático del sistema es no lineal, ya que al menos uno de los estados, en este caso, la posición del rotor es el argumento de una función no lineal. Para diseñar un controlador para el vuelo del sistema mostrado en la Fig. 3.2, el modelo no lineal debe ser linealizado teniendo en cuenta todos los parámetros de la planta descritos en [9].

Las ecuaciones no lineales del modelo matemático [51] del TRMS (Twin Rotor MIMO System), o sistema MIMO de doble rotor se derivan del modelo anterior mencionado, donde el movimiento en Pitch de eje vertical esta dado por la ecuación (3.1).

$$I_1 * \ddot{\Psi} = M_1 - M_{FG} - M_{B\psi} - M_G \quad (3.1)$$

El rotor tiene una no linealidad, la cual está dada por  $M_1$ . El torque se deduce por ello, dada la ecuación (3.2).

$$M_1 = a_1 * T_1^2 + b_1 * T_1 \quad (3.2)$$

El par gravitacional se genera alrededor del punto de pivote debido al peso del helicóptero, dado por la ecuación (3.3)

$$M_{FG} = M_g * \sin \Psi \quad (3.3)$$

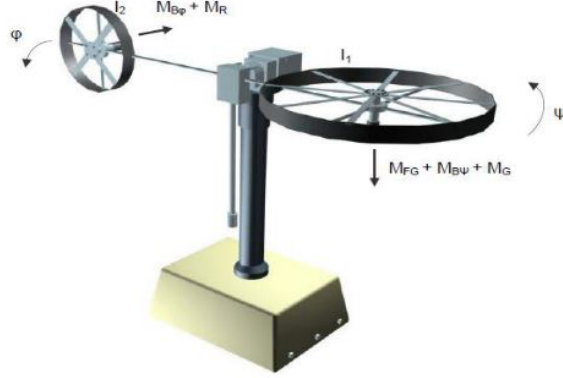


Figura 3.2: Modelo Matemático (Planta)

El par de fricción se modela como fricciones viscosas y de coulomb y se da en la ecuación (3.4).

$$M_{B\psi} = B_{1\psi} * \dot{\Psi} + B_{2\psi} * \sin(\dot{\Psi}) \quad (3.4)$$

Cuando el rotor principal cambia su posición en la dirección del azimut, se genera un torque en el giroscopio dado por la ecuación (3.5).

$$M_G = K_{gy} * M_1 * \dot{\Phi} * \cos \Psi \quad (3.5)$$

Para modelar circuitos de control eléctrico y de motor, se utiliza la función de transferencia de primer orden. En el dominio de Laplace, la cantidad de movimiento del motor está dada por la ecuación (3.6).

$$T_1 = \frac{K_1 * u_1}{T_{11}S + T_{10}} \quad (3.6)$$

En el plano horizontal de movimiento, se desarrollan ecuaciones similares para Yaw que están dadas por la ecuación (3.7), (3.8) y (3.9).

$$I_2 * \ddot{\Phi} = M_2 - M_{B\phi} - M_R \quad (3.7)$$

$$M_2 = a_2 * T_2^2 + b_2 * T_2 \quad (3.8)$$

$$M_{B\Psi} = B_{1\phi} * \dot{\Psi} + B_{2\phi} * \sin(\dot{\Phi}) \quad (3.9)$$

La función de transferencia de primer orden se usa para aproximar el momento de reacción cruzada  $M_R$  y está dada por la ecuación 3.10.

$$M_R = \frac{K_c(T_o S + 1) * T_1}{T_p S + 1} \quad (3.10)$$

$$T_2 = \frac{K_2 * u_2}{T_{21} S + T_{20}} \quad (3.11)$$

Se linealiza todo el modelo matemático en  $X_0$ .

$$X_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (3.12)$$

Hay siete estados y dos salidas para dos entradas. La salida y los vectores de estado están dados por la ecuación (3.13) y la ecuación (3.14).

$$x(t) = [\psi \ \phi \ T_1 \ T_2 \ M_R \ \dot{\psi} \ \dot{\phi}]^T \quad (3.13)$$

$$y(t) = [\psi \ \phi]^T \quad (3.14)$$

La representación general del espacio de estados de TRMS está representada a continuación:

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) \quad (3.15)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (3.16)$$

Después de la linealización y usando los parámetros dados en [51], se obtiene el siguiente sistema de matrices :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -0.909 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.218 & 0 & -0.5 & 0 & 0 \\ -4.705 & 0 & 1.358 & 0 & 0 & -0.088 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4.5 & -50 & -5 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0.8 \\ -0.35 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

### 3.3. Simulación del comportamiento del sistema en lazo abierto

Es importante tener presente el comportamiento del sistema en lazo abierto para tener un panorama claro del control del sistema cuando este se realice. Se realiza un esquema simple del sistema propuesto en ecuación de estados y se comparan las entradas del rotor principal y del rotor de cola con un escalón unitario.

Los resultados obtenidos al aplicar una entrada tipo STEP se muestran en las Figuras 3.4 y 3.5. En la Fig.3.4 podemos observar como el rotor principal tiene una respuesta oscilatoria ante la entrada de un escalón unitario. Esta respuesta es bastante intrínseca del sistema debido a la alta interacción de las variables que lo componen. Al no tener nada que lo estabilice o lo lleve a la referencia deseada se comporta de manera cada vez más oscilatoria.

Al igual que en respuesta de la figura anterior, en la Fig.3.5 tendremos una respuesta igual de oscilatorio sin embargo, con una característica adicional, y es un claro sobreimpulso inicial, esto se debe a muchos factores, pero uno de los que podrían influenciarlo es el tamaño de la hélice del rotor de cola, debido a que esta es menor tiende a verse afectada por el comportamiento de la hélice del rotor principal.

Esta simulación permite identificar diferentes aspectos, como: distintas respuestas del sistema en lazo abierto para su posterior análisis, realizar un estudio comparativo de las respuestas del sistema según su entrada debido a que la entrada escalón puede ser remplazada por otros tipos de entradas; adicionalmente, a nivel comparativo permite encontrar una mejor respuesta del sistema de control implementado.

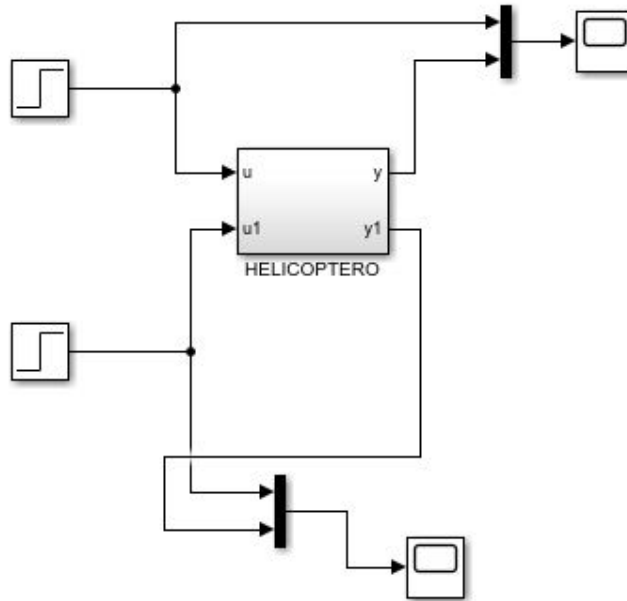


Figura 3.3: Simulación del sistema en lazo abierto

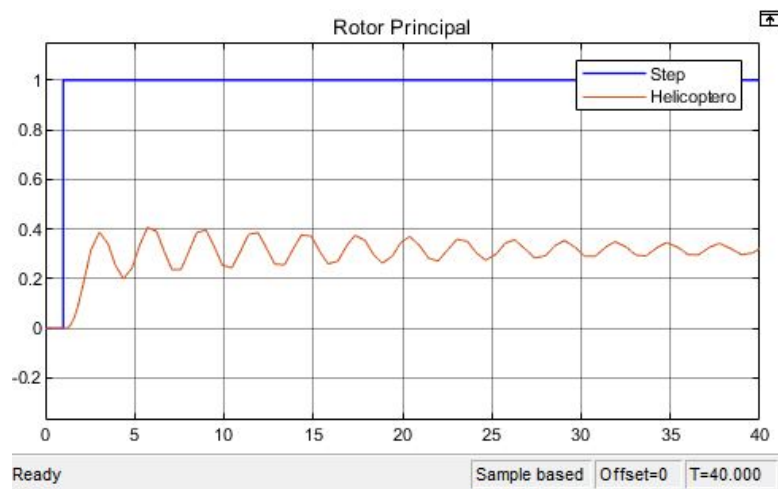


Figura 3.4: Respuesta rotor principal a un STEP

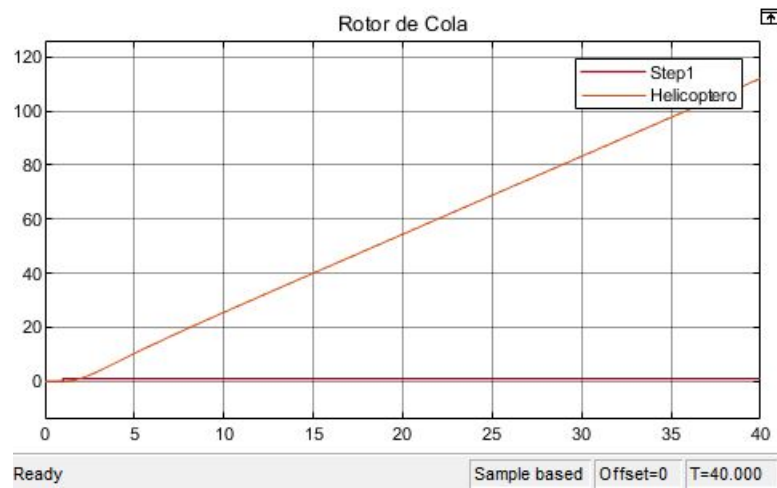


Figura 3.5: Respuesta rotor de cola a un STEP



## CAPÍTULO 4

---

### Métodos de control para un helicóptero de dos grados de libertad

---

#### 4.1. Generalidades del Control para sistemas MIMO

Como se pudo ver en el capítulo 2, los sistemas MIMO o multivariables son sistemas que cuentan con dos o más entradas y dos o más salidas. El sistema objeto de estudio de este trabajo es un sistema MIMO que cuenta con dos entradas y dos salidas que presenta interacción entre cada una de ellas, esto se evidencia en el sistema acoplado. Sin embargo, debido a que se busca trabajar el sistema por acción de cada rotor, se hizo necesario encontrar una función de transferencia o un modelo lineal que representara el sistema real; esto podría ser representado por una base de datos tomada del sistema real, o por una función de transferencia de cada rotor tomada por algún proceso de identificación; este ultimo es el caso de este trabajo. Las funciones de transferencia 4.1 y 4.2 tomadas de [9], modelan el comportamiento del sistema gracias a un proceso de identificación por mínimos cuadrados recursivos en el rotor principal y el rotor de cola respectivamente.

$$t_{fp} = \frac{-0.00160991z^2 - 0.000116914z + 0.010923}{z^3 - 1.19366z^2 - 0.318819z + 0.518724} \quad (4.1)$$

$$t_{fc} = \frac{1.97808z^2 - 0.00386559z - 0.0978556}{z^3 - 0.000807013z^2 + 0.0015364z + 0.00305298} \quad (4.2)$$

#### 4.2. Control PID Acoplado-Desacoplado

Uno de los controladores más utilizados para comparar el comportamiento de diferentes controladores sofisticados, es sin duda el controlador PID. Para este controlador se

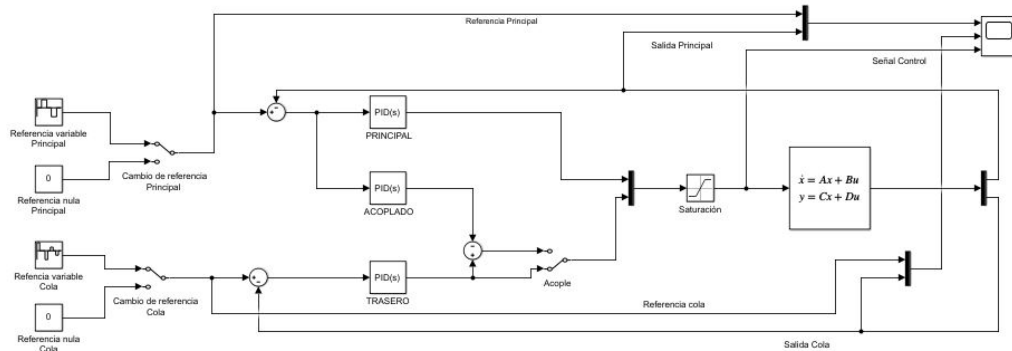


Figura 4.1: Simulación del controlador PID en la planta

realiza una simulación en el programa de simulink mostrada en la Fig 4.1.

Esta simulación contiene el sistema completo del helicóptero no tripulado de dos grados de libertad, visto en el sistema de espacio de estados del capítulo 4. Debido a que se busca mostrar la respuesta para un sistema desacoplado, encontrando así la señal del rotor principal y la señal del rotor de cola que se requiere para comparar resultados de los controladores en el capítulo 6. En este mismo esquema encontramos una señal de referencia variable para el rotor principal y para el rotor de cola, al igual que una referencia nula para ambos rotores cuando se desacople la planta, esto representa la entrada del sistema que se toma como referencia en la Fig. 6.1 y la Fig. 6.2. Adicionalmente, se encuentran los bloques de cada uno de los controladores PID para cada rotor y para el sistema acoplado, previamente sintonizados con ayuda de Simulink. Continuo a esto se encuentra un bloque de saturación que me permite eliminar el error de estado estable que me estaba presentando la señal de salida del sistema; obteniendo los resultados vistos en las figuras 6.1 y 6.2.

### 4.3. Control Inteligente

Aunque hay diferentes tipos de control inteligente por redes neuronales, era importante encontrar cual sería el modelo que se adaptaría mejor al sistema. Debido a la complejidad del sistema, se decidió encaminar la investigación por el diseño de neurocontrolador NARMA-L2, debido a su facilidad de diseño con respecto a los neurocontroladores basados en un modelo de referencia o neurocontroladores predictivos.

#### 4.3.1. Redes neuronales por Modelo NARMA-L2

El neurocontrolador descrito en esta sección recibe dos nombres diferentes: control de linealización por retroalimentación y control NARMA-L2. Se denomina linealización

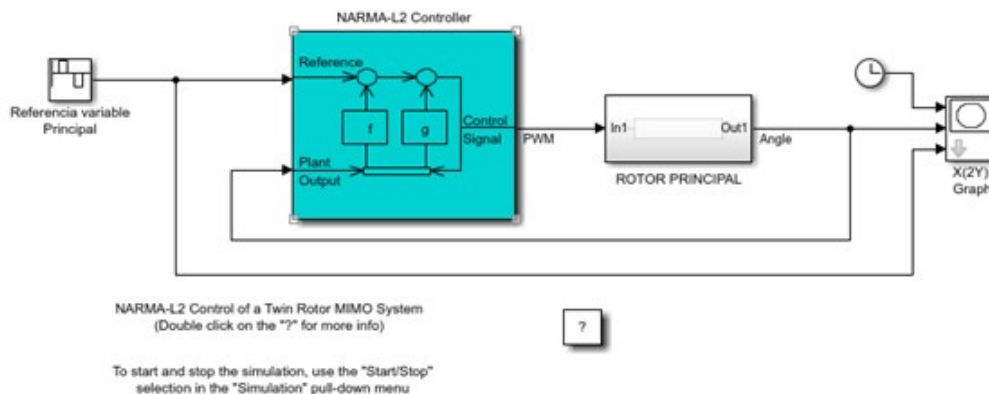


Figura 4.2: Diagrama de control NARMA-L2 para el rotor principal

por retroalimentación cuando el modelo de planta tiene una forma particular (forma complementaria). Se denomina control NARMA-L2 cuando el modelo de la planta se puede aproximar de la misma forma. La idea central de este tipo de control es transformar la dinámica del sistema no lineal en dinámica lineal cancelando las no linealidades. Esta sección comienza presentando el modelo de sistema de formulario complementario y mostrando cómo puede usar una red neuronal para identificar este modelo. Luego describe cómo el modelo de red neuronal identificado puede usarse para desarrollar un controlador. A esto le sigue un ejemplo de cómo utilizar el bloque de control NARMA-L2, que se encuentra en el conjunto de bloques Deep Learning Toolbox.

### Rotor Principal

Se realiza el montaje del diagrama de bloques con el programa de Simulink, con el controlador anteriormente propuesto; obteniendo como resultado la Fig.4.2

Al igual que para el controlador PID, se utiliza un bloque de referencia variable con los mismos valores de referencia que para el PID del rotor principal, de esta forma se realiza una adecuada comparación. Seguido de esto, encontramos el bloque de control, configurado según se menciona en el capítulo 5. A la salida de la señal de control se coloca el sistema, que en este caso es una función de transferencia del rotor principal; debido a que la misma debe corresponder al sistema real se utilizó la mencionada en el capítulo 5. La entrada del sistema corresponde a los valores configurados en la Fig.5.1, correspondientes a la señal de PWM en el sistema real, mientras que la salida corresponden a valores en radianes correspondientes a la posición angular del rotor principal en el sistema real; esta misma salida se realimenta a la entrada del controlador para finalmente obtener el diagrama de control en lazo cerrado.

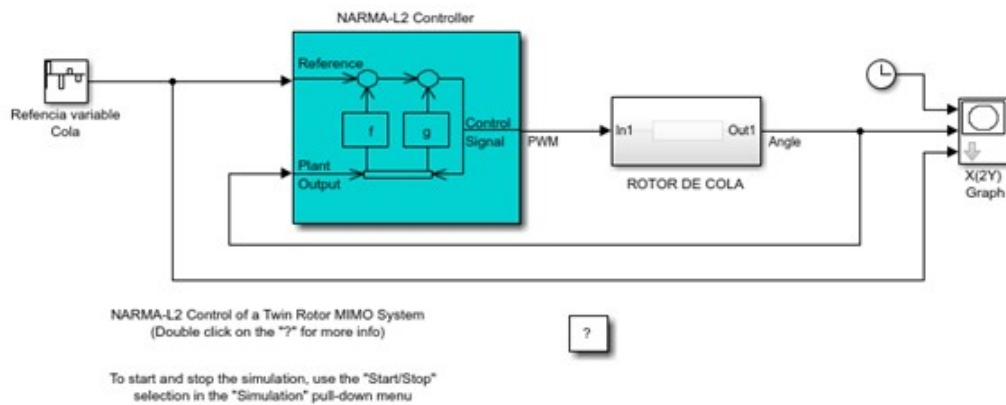


Figura 4.3: Diagrama de control NARMA-L2 para el rotor de cola

### Rotor de Cola

Al igual que en el diagrama anterior, se presenta el diagrama de bloques del lazo de control en Simulink para el rotor de cola, en la Fig.4.3

De la misma forma se utiliza un bloque de referencia variable a la entrada del controlador, que permite una comparativa con el PID del mismo rotor, ya que son los mismos valores de referencia. Los parámetros configurados de este controlador se pueden observar en la Fig.5.2, donde finalizado el proceso de control, se obtiene una señal de salida al sistema real del rotor de cola representado por una función de transferencia mencionada en el capítulo 5. Al igual que el rotor principal la entrada del sistema es un PWM y la salida su posición angular en radianes. Finalmente obtenemos el diagrama de control en lazo cerrado para el rotor de cola de la Fig.4.3.

## CAPÍTULO 5

---

### Marco Experimental

---

AL trabajar con neurocontroladores tipo NARMA-L2 es importante tener en cuenta algunos aspectos de diseño si queremos obtener la mejor respuesta de este.

#### 5.1. Detalles del controlador para el rotor principal

En la Fig. 4.2, se ve el diagrama de control NARMA-L2 para el rotor principal, a partir de aquí se abre una ventana donde se configuran los parámetros del controlador como se muestra en la Fig. 5.1.

Esta ventana permite entrenar el modelo NARMA-L2. No hay una ventana separada para el controlador, porque el controlador se determina directamente a partir del modelo. Según la Fig. 5.1, lo primero que se configura es la arquitectura de la red, comenzando por el tamaño de la capa oculta, el número de entradas con retraso de la planta y número de salidas. Se sugieren los mostrados en la imagen y pasamos a configurar los parámetros de entrenamiento. En la siguiente sección se configura el número de muestras que el sistema utilizará para generar la DATA de entrenamiento, adicional a esto, se configuran los límites por los cuales se entrenará el sistema, esto debe realizarse según las entradas y dependiendo de la referencia que se esté cargando. Para este caso en particular, el sistema real varía en un rango de 30 y -30 grados lo que en radianes se traduce entre -0.25 y 0.25 radianes como valor mínimo y máximo respectivamente a la salida.

Adicionalmente, se carga el modelo correspondiente al rotor de cola; antes de generar la DATA de entrenamiento. En la última sección se configuran los parámetros de entrenamiento, una vez generada la DATA de entrenamiento, estos parámetros se derivan en una función de entrenamiento de la red neuronal y un número específico de 'Epochs', que en términos de redes neuronales artificiales, se refiere a un ciclo a través del conjunto de datos de entrenamiento completo, en este caso se configura 200, aunque este dato varía una vez culmine el entrenamiento, dado que la red puede culminar el entrenamiento mucho

Plant Identification - NARMA-L2

Network Architecture

Size of Hidden Layer

7

No. Delayed Plant Inputs

2

Sampling Interval (sec)

0.01

No. Delayed Plant Outputs

2

☒ Normalize Training Data

Training Data

Training Samples

2500

☒ Limit Output Data

Maximum Plant Input

0.5

Maximum Plant Output

0.25

Minimum Plant Input

-0.5

Minimum Plant Output

-0.25

Maximum Interval Value (sec)

1

Simulink Plant Model:

Browse

Minimum Interval Value (sec)

0.01

RotorPrincipal\_PR

Generate Training Data

Import Data

Export Data

Training Parameters

Training Epochs

200

Training Function

trainlm

☒ Use Current Weights

☒ Use Validation Data

☒ Use Testing Data

Train Network

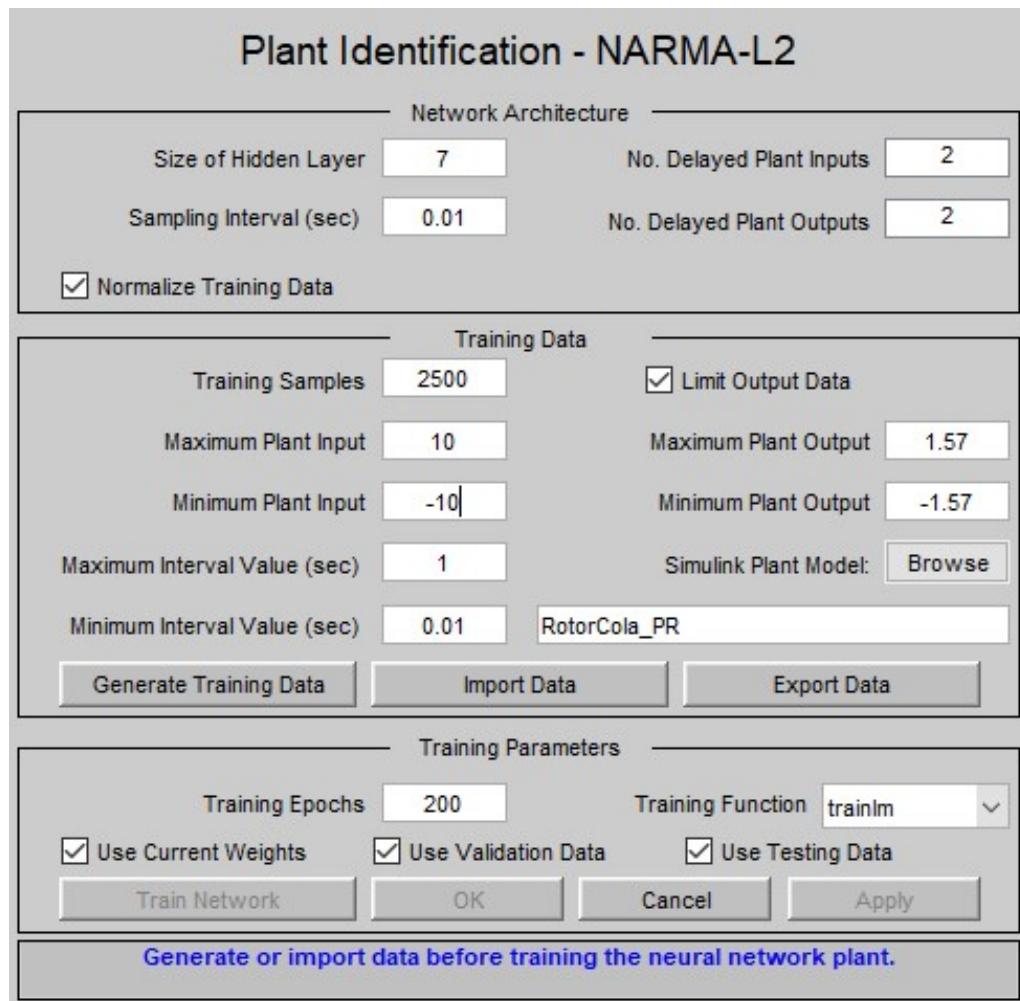
OK

Cancel

Apply

Generate or import data before training the neural network plant.

Figura 5.1: Parámetros configurados en el controlador del rotor principal



**Plant Identification - NARMA-L2**

**Network Architecture**

Size of Hidden Layer: 7

Sampling Interval (sec): 0.01

No. Delayed Plant Inputs: 2

No. Delayed Plant Outputs: 2

☒ Normalize Training Data

**Training Data**

Training Samples: 2500

Maximum Plant Input: 10

Minimum Plant Input: -10

Maximum Plant Output: 1.57

Minimum Plant Output: -1.57

☒ Limit Output Data

Maximum Interval Value (sec): 1

Minimum Interval Value (sec): 0.01

Simulink Plant Model:

**Training Parameters**

Training Epochs: 200

Training Function: trainlm

☒ Use Current Weights ☒ Use Validation Data ☒ Use Testing Data

**Generate or import data before training the neural network plant.**

Figura 5.2: Parámetros configurados en el controlador del rotor de cola

antes.

## 5.2. Detalles del controlador para el rotor de cola

En la Fig.4.3, se muestra el diagrama de control NARMA-L2 para el rotor principal, a partir de aquí se abre una ventana donde se configuran los parámetros del controlador como presenta en la Fig.5.2.

Al igual que se mencionó anteriormente, para el rotor de cola, se configuran los parámetros del mismo controlador.

Según la Fig.5.2, al configurar la arquitectura de la red, comenzando por el tamaño de la capa oculta, el número de entradas con retraso de la planta y número de salidas. Se

sugieren los mostrados en la imagen y se procede a configurar los parámetros de entrenamiento.

En la siguiente sección se deben configurar los límites para generar la DATA de entrenamiento; debido a que el rotor de cola varía en un rango de 90 y -90 grados lo que implica entre -1.57 y 1.57 radianes como valor mínimo y máximo respectivamente.

En la última sección se configuran los parámetros de entrenamiento, una vez generada la DATA de entrenamiento, estos parámetros se derivan en una función de entrenamiento de la red neuronal, que para este caso es la misma que para el rotor principal, al igual que el número de 'Epochs'.



## CAPÍTULO 6

---

### Resultados

---

En este capítulo se muestran los diferentes resultados obtenidos en la simulación de cada uno de los controladores con el sistema propuesto en el capítulo 4, aplicado al sistema real obtenido por medio de una identificación del mismo sistema realizada en en [9].

#### 6.1. Resultados Controlador PID

A partir de la simulación mostrada en el capítulo 4, en la Fig. 4.1, se puede observar la respuesta que tiene el controlador PID en ambos rotores.

##### 6.1.1. Control PID en el Rotor Principal

Para esta primera respuesta, se muestra la señal de control individual en el rotor principal, teniendo en cuenta que se han sintonizado las constantes del controlador de manera experimental.

En la Fig. 6.1, podemos observar en el primer cuadrante, la señal del rotor principal alcanzar de manera exitosa la referencia dada, al mismo tiempo en el segundo cuadrante, la señal del rotor de cola tiene pequeñas perturbaciones; esto se da debido a que el tamaño de la hélice principal es mayor a la hélice del rotor de cola, sin embargo, el sistema tiende a eliminar este error de posición respecto a la referencia.

##### 6.1.2. Control PID en el Rotor de Cola

La segunda respuesta muestra la señal de control individual sobre el rotor de cola. Al igual que el rotor principal, las tres acciones del control PID han sido sintonizadas de manera experimental.

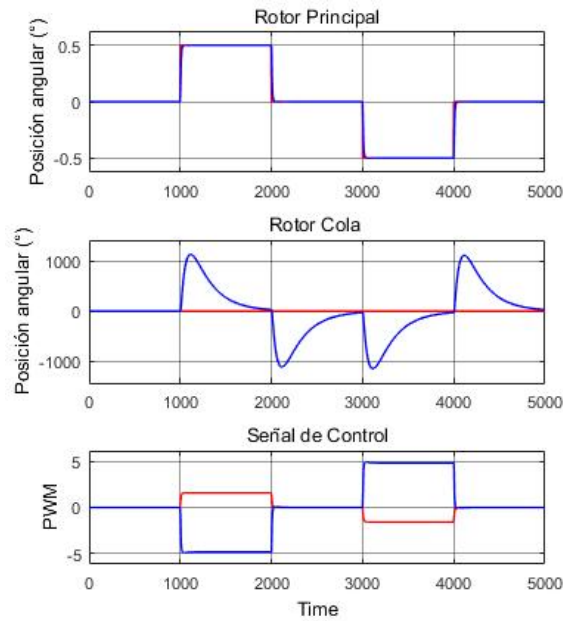


Figura 6.1: Respuesta controlador PID en el rotor principal[15]

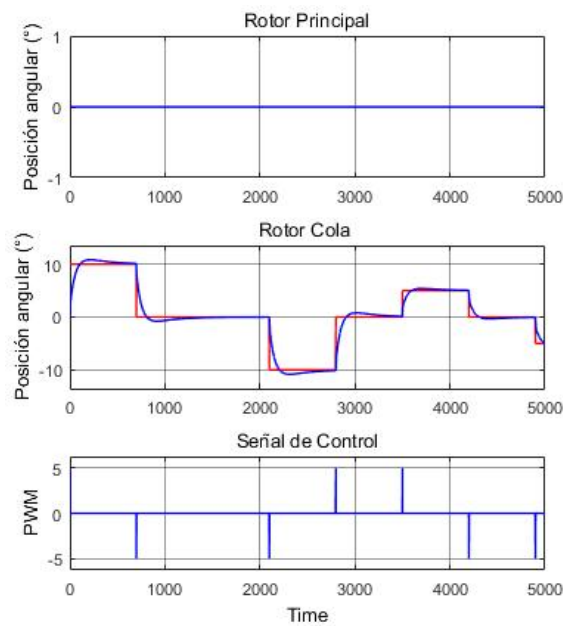


Figura 6.2: Respuesta controlador PID en el rotor de cola [15]

Como se puede apreciar en la Fig. 6.2, la señal del rotor de cola sigue de forma exitosa la referencia, con un sobre-impulso despreciable. Por otro lado, se puede apreciar en el primer cuadrante, como la señal del rotor principal carece de oscilaciones, esto se debe al tamaño de las hélices, donde la hélice principal no genera ningún movimiento angular en la cola.

## 6.2. Resultados Control Inteligente: NARMA-L2

Este tipo de control, como bien se expuso en el capítulo anterior, presenta tres tipos de resultados. Un primer resultado parte de la generación de datos configurando los parámetros necesarios expuestos en el capítulo anterior, el segundo resultado se presenta al realizar el entrenamiento de la red neuronal y, finalmente, como resultado de control se obtiene el seguimiento de la señal de cada rotor a una referencia dada.

### 6.2.1. Rotor Principal

A partir de los parámetros configurados en la Fig. 5.1 en la sección de entrenamiento, se obtiene la DATA de entrenamiento, este paso reúne el comienzo de la identificación de la planta debido a que el sistema genera datos de entrada y de salida de la planta. Para el rotor principal se utilizaron 2500 iteraciones, estos resultados se pueden ver en la Fig. 6.3.

Es importante notar como en la Fig. 6.3 lo datos de entrada de la planta para el proceso de identificación se limitan bajo los parámetros previamente configurados, debido a que la referencia se realiza entre -0.5 y 0.5 el sistema se entrena con estos datos para tener una respuesta adecuada, en el gráfico inferior de la misma figura vemos que a la salida se obtienen los datos de entrenamiento que corresponden a los datos de entrada con una pequeña diferencia de magnitud, la cual podrá notarse en el gráfico siguiente donde se visualiza el error de la señal.

El siguiente paso, antes de obtener resultados de control, corresponde al entrenamiento de la red. Como se mencionó anteriormente se configura el tipo de función y el número de ciclos de entrenamiento, por medio de un proceso experimental se llegó a la respuesta mostrada en la Fig. 6.4.

Notese que en la Fig.6.4, se puede observar la entrada y la salida de la planta; en los cuadrantes superiores y en el cuadrante inferior derecho se observa la seña de salida del entrenamiento de la red neuronal, una respuesta bastante similar a la salida del sistema. Finalmente, en el cuadrante inferior izquierdo se observa el error final del entrenamiento, un error bastante pequeño en comparación a las referencias de entrada y salida. Esto demuestra un adecuado entrenamiento de la red neuronal.

Una vez se aceptaron los datos de entrenamiento de la red neuronal, se cargó nuevamente el sistema para obtener los resultados del controlador NARMA-L2 para el rotor principal, visto en la Fig.6.5.

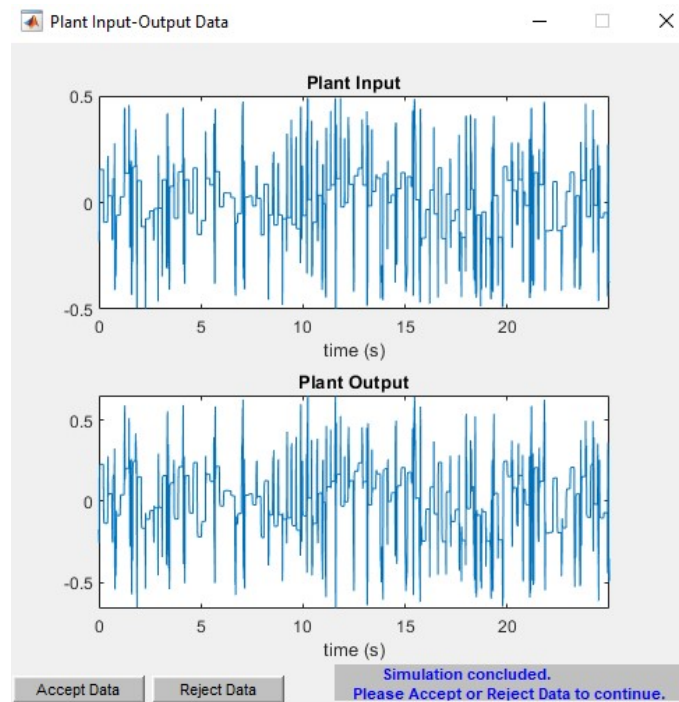


Figura 6.3: Generación de datos de entrenamiento - Rotor Principal

La Fig.6.5, muestra la respuesta ante 5 cambios de referencias dados en intervalos de tiempo de 10 segundos. Se puede apreciar que la señal del rotor principal responde con rapidez a cada cambio de referencia pero presenta un error de estado relativamente pequeño para las referencias positivas, error predecible a partir del entrenamiento de la red neuronal; en cuanto a las referencias negativas el comportamiento de la señal es óptimo. Otra característica notoria para la misma respuesta es que la señal sigue las referencias sin presentar oscilaciones.

### 6.2.2. Rotor de Cola

A partir de los parámetros configurados en la Fig.5.2 en la sección de entrenamiento, se obtiene la DATA de entrenamiento, este paso es esencial para que la red pueda conocer las dinámicas de funcionamiento de la plata. Para el rotor de cola se utilizaron 2500 iteraciones, estos resultados se pueden ver en la Fig.6.6.

comparando los datos de la entrada del sistema con los datos de salida, de la Fig.6.6, se puede notar un adecuado comportamiento en cuando a la generación de Data se refiere.

El siguiente paso, antes de obtener resultados de control, corresponde al entrenamiento de la red. Configuradas el tipo de función y el número de ciclos se procede a mostrarlos resultados como se expone en la Fig. 6.7.

De la Fig. 6.7, se puede observar como para una entrada y salida de datos del entre-

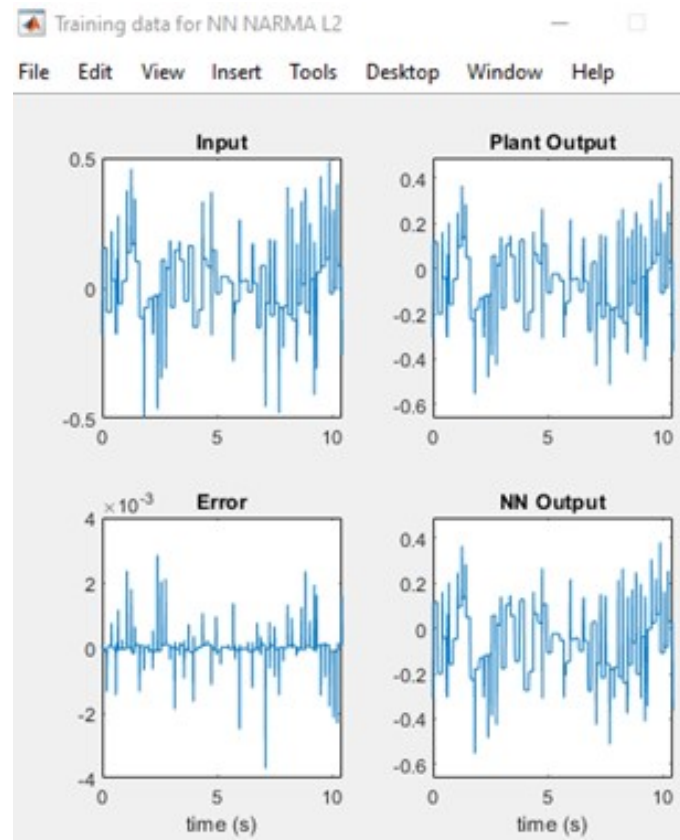


Figura 6.4: Entrenamiento de la red Neuronal - Rotor Principal

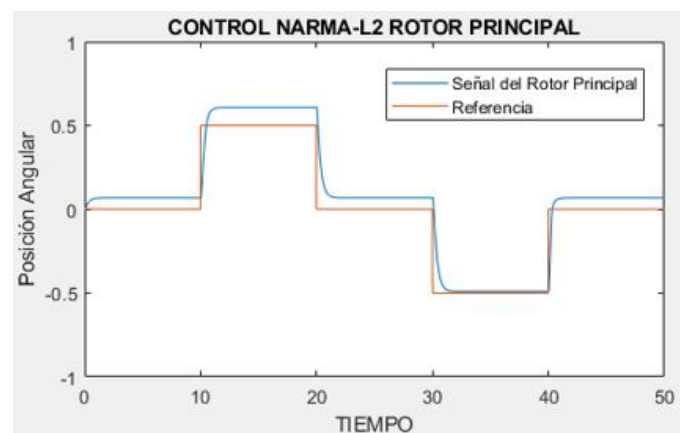


Figura 6.5: Resultado Final Control inteligente del Rotor Principal

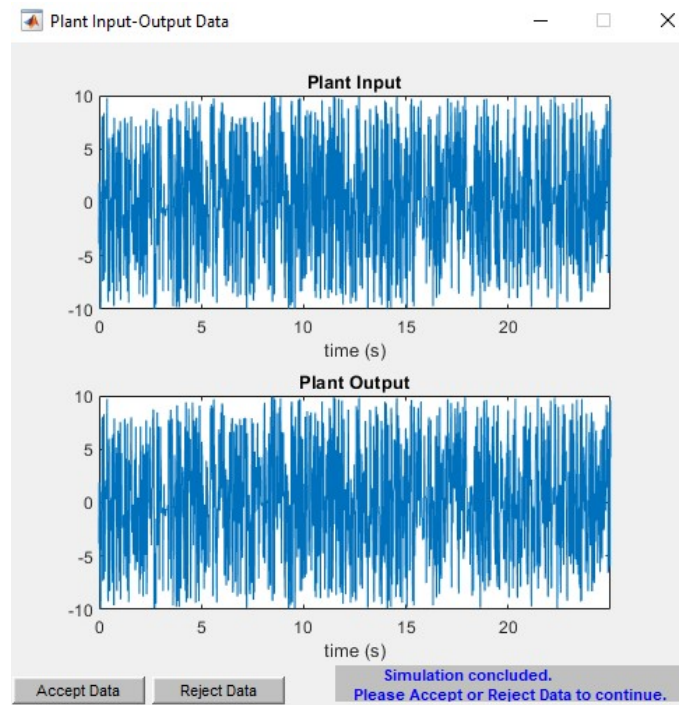


Figura 6.6: Generación de datos de entrenamiento - Rotor de Cola

namiento de la red neuronal, presentados en los cuadrantes superiores y en el cuadrante inferior derecho, se obtiene un error considerablemente pequeño.

Una vez se aceptaron los datos de entrenamiento de la red neuronal, se carga el sistema para obtener los resultados del controlador NARMA-L2 para el rotor de cola, visto en la Fig.6.8.

A partir del proceso anterior, se obtuvo una respuesta en la Fig.6.8, en la cual se observa el seguimiento de los múltiples cambios de referencia para el rotor de cola, sin oscilaciones, sin error de estado estacionario, y con un sobre impulso notable en for de *delta de dirac*, dado para cada cambio de referencia.

### 6.3. Comparación de resultados

En esta sección se realiza un breve análisis comparativo de los resultados obtenidos por el controlador por redes neuronales, el controlador NARMA-L2 y los resultados obtenidos por el controlador clásico PID para una misma referencia.

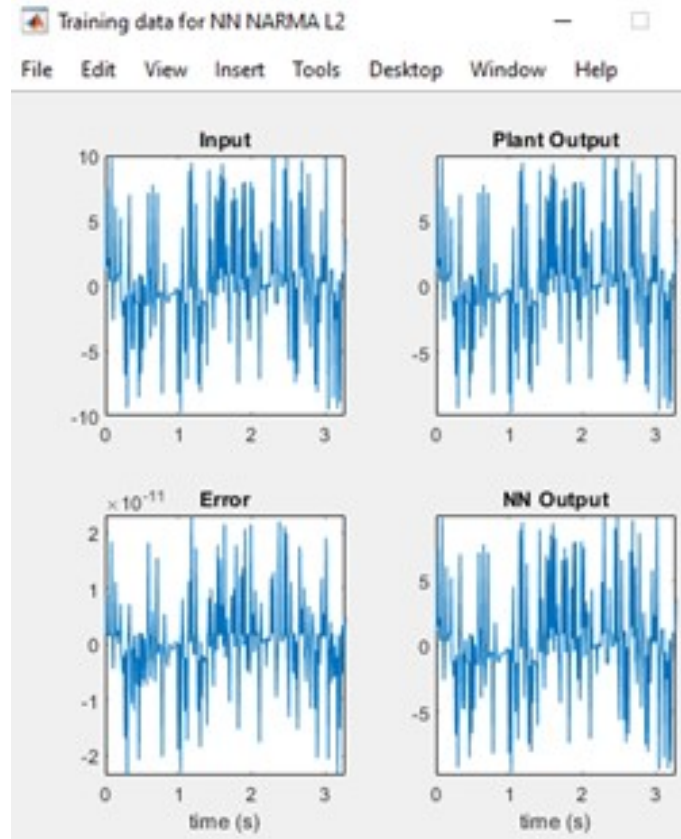


Figura 6.7: Entrenamiento de la red Neuronal - Rotor de Cola

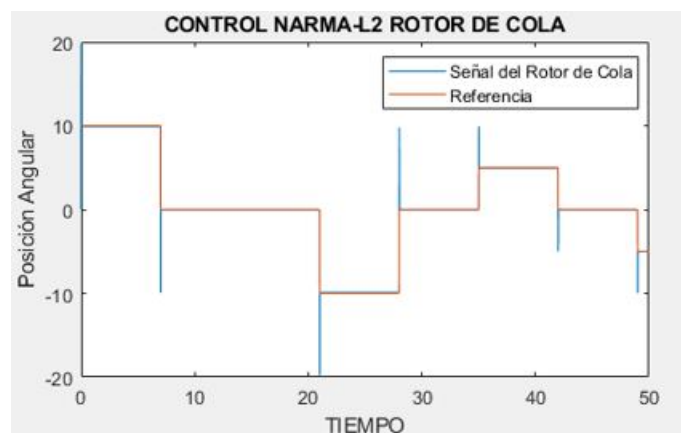


Figura 6.8: Resultado Final Control inteligente del Rotor de Cola

### 6.3.1. Rotor Principal

En la Fig.6.1, se puede ver la respuesta del controlador PID en el primer cuadrante para el rotor principal, se puede observar como la señal de este rotor alcanza de manera exitosa la referencia, sin perturbaciones, de forma rápida y sin error de estado estacionario, mientras que en la Fig.6.5, para el mismo rotor se observa la respuesta del controlador NARMA-L2 donde la señal del rotor principal hace un adecuado seguimiento a la señal de referencia de forma rápida y sin perturbaciones, sin embargo este tiene un pequeño error de estado estacionario para las referencias positivas y alcanza de forma exitosa la referencia negativa.

### 6.3.2. Rotor de Cola

Al analizar los resultados obtenidos en la Fig.6.2, se ve en el segundo cuadrante la señal del rotor de cola siguiendo la señal de referencia de manera precisa, sin perturbaciones, con un pequeño sobreimpulso en cada cambio de referencia pero llegando sin dificultad y de forma rápida a la señal de referencia. En la Fig.6.5, se observa como la señal del rotor principal llega de forma perfecta a la referencia, con un alto sobreimpulso que es corregido inmediatamente, alcanzando la referencia sin perturbaciones evidentes.



### Conclusiones

---

- Los dos controladores implementados tuvieron un desempeño satisfactorio en ambos rotores del helicóptero de dos grados de libertad,.
- La respuesta del controlador por redes neuronales no iguala a la respuesta del PID en el control del rotor principal, esto se debe a que requiere un alto costo computacional y considerable numero de iteraciones para el entrenamiento de la red neuronal. Sin embargo, la respuesta fue rápida y con un error de estado estacionario muy pequeño que puede mejorarse en futuros trabajos.
- Una clara ventaja del uso de controladores inteligentes por redes neuronales es su adaptabilidad a los cambios de referencia y a las variaciones en la planta, esto se consigue con el entrenamiento de la red lo que facilita la implementación del controlador. En contraposición, el PID trabaja solo alrededor de los puntos de operación dispuestos por el procedimiento de linealización, lo que conlleva a inestabilidades fuera de ese marco; a demás, cambios en la planta implican recalcular las ganancias del controlador.
- Aunque la respuesta del controlador NARMA-L2 en el rotor principal no fue la más óptima, se puede inferir por su comportamiento que un entrenamiento de mayor grado, con un alto coste computacional puede arrojar una respuesta similar a la obtenida en el rotor de cola, que demostró ser la más eficiente.
- El controlador PID sigue demostrando su eficacia ante modelos SISO, más estudios sobre redes neuronales, y la aplicación de estos controladores sobre el sistemas MIMO acoplado es necesaria para dar luces sobre el funcionamiento de los sistemas de control inteligentes.

### Recomendaciones

---

#### 8.1. Uso de bloque de control

La configuración del bloque de control NARMA-L2, se debe realizar constantemente, con el objetivo de encontrar la mejor respuesta en el sistema, es por ello que se recomienda durante el entrenamiento de la red, no cerrar ninguna de las ventanas del bloque de control debido a que esta información no se guarda hasta que el proceso culmine.

#### 8.2. Motores de búsqueda

Uno de los principales motores de búsqueda de este trabajo fue SCOPUS, Google Scholar, Web of Science e IEEE xlore, son plataformas que se pueden encontrar en el portal institucional y que permiten una búsqueda confiable, con información precisa y artículos relevantes al objeto de investigación.

#### 8.3. Coste computacional

Debido a que el uso de controladores por redes neuronales requieren un constante entrenamiento de la red neuronal e implican diferentes procesos de alto coste computacional, se recomienda realizar las simulaciones en un dispositivo con alta velocidad de RAM y con un procesador corei3 o superior.

## CAPÍTULO 9

---

### Presupuesto

---

Los recursos financieros con los que se planeó trabajar durante el segundo semestre de 2020, se pueden observar en la Fig.9.1.

Debido a la condición actual por el covid-19, no se utilizaron los recursos presupuestados, al realizarse las reuniones de manera virtual y al obtener resultados de simulación, no se realizaron gastos de administración ni de transporte; sin embargo, el tiempo estimado se cumplió para cada una de las actividades, y se hizo uso de los recursos materiales.

ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN	RUBRO	TIEMPO DE EJECUCIÓN	VALOR UNITARIO	TOTAL
1.1	Consultar referencias bibliográficas y en la web que describan el principio de funcionamiento de un controlador PID en Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT).	Transporte y gastos de administración	12 desplazamientos - (2 horas) - 6 días	\$ 2,100	\$ 24,000
1.2	Buscar referencias bibliográficas y en la web que describan el principio de funcionamiento de diferentes tipos de controladores inteligentes aplicados en VANT.	Gasto de Administración	(12 horas) - 4 días	\$ 2,000	\$ 24,000
1.3	Analizar la información necesaria para el diseño del controlador PID y del controlador inteligente seleccionado.	Gasto de Administración	(6 horas) - 2 días	\$ 2,000	\$ 12,000
1.4	Consultar la información obtenida con el director del proyecto.	Transporte	2 desplazamientos	\$ 2,100	\$ 4,200
2.1	Realizar un estudio detallado del funcionamiento de todos los elementos que comprende el sistema a controlar.	Transporte y gastos de administración	12 desplazamientos - (12 horas) - 6 días	\$ 2,100	\$ 25,200
2.2	Ajustar todos los elementos del sistema verificando que se encuentren en correcto funcionamiento.	Insumos y materiales.	Arduino UNO y MPU6050.	\$ 60,000	\$ 60,000
		Transporte	12 desplaza. - (6 días)	\$ 2,100	\$ 25,200
2.3	Plantear el modelo matemático del helicóptero que se utilizará en el desarrollo de los controladores.	Gasto de Administración	(10 horas) - 5 días	\$ 2,000	\$ 20,000
2.4	Consultar la información obtenida con el director del proyecto	Transporte	2 desplazamientos	\$ 2,100	\$ 4,200
3.1	Simular el modelo matemático del sistema para encontrar los valores óptimos de cada controlador.	Gasto de Administración	(12 horas) - 6 días	\$ 2,000	\$ 24,000
3.2	Esquematizar el diagrama de control PID y del controlador inteligente en LabVIEW.	Gasto de Administración	(20 horas) - 10 días	\$ 2,000	\$ 40,000
3.3	Consultar la información obtenida con el director del proyecto.	Transporte	2 desplazamientos	\$ 2,100	\$ 4,200
4.1	Realizar las conexiones necesarias del sistema real con el programa en LabVIEW.	Transporte y gastos de administración	(2 horas) - Un día	\$ 2,100	\$ 4,200
4.2	Analizar los datos obtenidos para cada uno de los controladores.	Gasto de Administración	(6 horas) - 2 días	\$ 2,000	\$ 12,000
4.3	Comparar las señales de control obtenidas para cada tipo de controlador	Gasto de Administración	(4 horas) - 4 días	\$ 2,000	\$ 8,000
4.4	Consultar la información obtenida con el director del proyecto.	Transporte	2 desplazamientos	\$ 2,100	\$ 4,200
TOTAL					\$ 295,400

Figura 9.1: Presupuesto

---

## Bibliografía

---

- [1] C. Koparan, A. Bulent Koc, C. V. Privette, C. B. Sawyer, and J. L. Sharp, “Evaluation of a UAV-Assisted Autonomous Water Sampling,” *Water*, 2018. [Online]. Available: [www.mdpi.com/journal/water](http://www.mdpi.com/journal/water)
- [2] C. Koparan, A. B. Koc, C. V. Privette, and C. B. Sawyer, “In Situ Water Quality Measurements Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) System,” *Water*, 2018. [Online]. Available: [www.mdpi.com/journal/water](http://www.mdpi.com/journal/water)
- [3] —, “Autonomous In Situ Measurements of Noncontaminant Water Quality Indicators and Sample Collection with a UAV,” *Water*, 2019. [Online]. Available: [www.mdpi.com/journal/water](http://www.mdpi.com/journal/water)
- [4] —, “Adaptive Water Sampling Device for Aerial Robots,” *Drones*, 2020. [Online]. Available: [www.mdpi.com/journal/drones](http://www.mdpi.com/journal/drones)
- [5] Secretary General, “International Civil Aviation O International Civil Aviation Organization,” International Civil Aviation Organization, Tech. Rep., 2011.
- [6] A. Sharma, P. Vanjani, N. Paliwal, C. M. Basnayaka, D. N. K. Jayakody, H. C. Wang, and P. Muthuchidambaranathan, “Communication and networking technologies for UAVs: A survey,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 168, no. December 2019, p. 102739, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102739>
- [7] S. Chen, D. F. Laefer, and E. Mangina, “State of Technology Review of Civilian UAVs,” *Recent Patents on Engineering*, 2016.
- [8] I. Sadeghzadeh and Y. Zhang, “A review on fault-tolerant control for unmanned aerial vehicles (UAVs),” in *AIAA Infotech at Aerospace Conference and Exhibit 2011*. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., 2011. [Online]. Available: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2011-1472>

- [9] ANGELO ANTONIO MARIN LÓPEZ, “CONTROL MULTIVARIABLE NO LINEAL DE ESTRUCTURA VARIABLE APLICADO A UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO,” Ph.D. dissertation, Universidad Tecnológica de Pereira, 2017. [Online]. Available: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/8374>
- [10] C. M. Lin, C. F. Tai, and C. C. Chung, “Intelligent control system design for UAV using a recurrent wavelet neural network,” *Neural Computing and Applications*, vol. 24, no. 2, pp. 487–496, 11 2014. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00521-012-1242-5>
- [11] G. Shi and S. Yang, “Intelligent control of UAV with neuron-fuzzy approach under hierarchical architecture,” in *Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, 2008, pp. 5238–5243.
- [12] H. Mo and G. Farid, “Nonlinear and Adaptive Intelligent Control Techniques for Quadrotor UAV – A Survey,” *Asian Journal of Control*, vol. 21, no. 2, pp. 989–1008, 3 2019. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/asjc.1758>
- [13] TravTigerEE, “Aplicaciones PID 4r4r,” *Rocatek*, 2010. [Online]. Available: [http://www.rocatek.com/forum\\_lazos\\_control.php](http://www.rocatek.com/forum_lazos_control.php)
- [14] “Colored neural network es - Red neuronal artificial - Wikipedia, la enciclopedia libre.” [Online]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Red\\_neuronal\\_artificial#/media/Archivo:Colored\\_neural\\_network\\_es.svg](https://es.wikipedia.org/wiki/Red_neuronal_artificial#/media/Archivo:Colored_neural_network_es.svg)
- [15] L. Mariana, C. Adrian, and G. E, “Análisis e implementación de un controlador PID en un helicóptero no tripulado de dos grados de libertad,” 2020.
- [16] “DeltaQuad - VTOL Surveillance Drone / UAV for long range EO/IR.” [Online]. Available: <https://www.deltaquad.com/vtol-drones/view/>
- [17] “Uncrewed Aircraft Systems (UAS) | Department of Geography & Environment.” [Online]. Available: <https://geog.sfsu.edu/UAS>
- [18] “Regulación de Drones en Colombia - APD.” [Online]. Available: [https://apd.ong/regulacion-de-drones-en-colombia/?gclid=CjwKCAiAkan9BRAqEiwAP9X6UfLOJpTe\\_U1NBoxkzCkMKTyG-NKTFAb0xINEnwJK-Hkj7YW-3mF9zhoC5P0QAvD\\_BwE](https://apd.ong/regulacion-de-drones-en-colombia/?gclid=CjwKCAiAkan9BRAqEiwAP9X6UfLOJpTe_U1NBoxkzCkMKTyG-NKTFAb0xINEnwJK-Hkj7YW-3mF9zhoC5P0QAvD_BwE)
- [19] “La irrupción de los drones en la agricultura.” [Online]. Available: <https://www.ainia.es/tecnoalimentalia/tecnologia/drones-agricultura-de-precision/>

- [20] “Agricultural Drone ASTA Technology Co., Limited.” [Online]. Available: [https://www.szasta.com/product/Agricultural-Drone.html?gclid=CjwKCAiAkan9BRAqEiwAP9X6URF7oowQeVToQugUm8KfreEIsORb4v5\\_pI3J\\_MXv9qA3\\_KnDEm6UPRoCcd8QAvD\\_BwE](https://www.szasta.com/product/Agricultural-Drone.html?gclid=CjwKCAiAkan9BRAqEiwAP9X6URF7oowQeVToQugUm8KfreEIsORb4v5_pI3J_MXv9qA3_KnDEm6UPRoCcd8QAvD_BwE)
- [21] F. D. Sedano Mateo and R. W. Pari Rendon, “FACULTAD DE INGENIERÍA Carrera de Ingeniería Civil,” Univeridad Privada del Norte, Tech. Rep., 9 2019. [Online]. Available: <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/21067>
- [22] “REVISIÓN TECNOLÓGICA, NORMATIVA Y APLICACIONES DE ... - REVISTA DE INGENIERIA DYNANA.” [Online]. Available: <https://www.revistadyna.com/busqueda/revision-tecnologica-normativa-y-aplicaciones-de-vehiculos-aereos-no-tripulados-en-ingenieria-part>
- [23] A. Barrientos, J. Del Cerro, P. Gutiérrez, R. San Martín, A. Martínez, and C. Rossi, “Vehículos aéreos no tripulados para uso civil. Tecnología y aplicaciones,” *Grupo de Robótica y Cibernética, Universidad Politécnica de Madrid*, pp. 1–29, 2009. [Online]. Available: <http://webdiis.unizar.es/~neira/docs/ABarrientos-CEDI2007.pdf>  
<http://webdiis.unizar.es/~neira/docs/ABarrientos-CEDI2007.pdf>
- [24] D. Aleksandrov and I. Penkov, “Energy Consumption of Mini UAV Helicopters with Different Number of Rotors,” Tallinn University of Technology, Tech. Rep., 2012.
- [25] R. Baldick, *Applied Optimization*. Kluwer Academic Publishers, 2006.
- [26] R. Galán, A. Jiménez, R. Sanz, and F. Martíá, “Control Inteligente,” *INTELIGENCIA ARTIFICIAL*, 2000.
- [27] Osmar. (2017, oct) Drones (vehículo aéreo no tripulado). [Online]. Available: <https://es.calameo.com/read/005523481e804a875be09>
- [28] M. A. Laughton and D. Warne, *Electrical Engineer’s Reference Book*, 16th ed. Newnes, 9 2002.
- [29] E. A. Parr, *Logic Designer’s Handbook: Circuits and Systems*, 2nd ed. Newness, 1993.
- [30] I. Sinclair and J. Dunton, *Electronic and Electrical Servicing: Consumer and Commercial Electronics*. Routledge, 2007.
- [31] “Conceptos Básicos: Sistemas de Control | ISA México Sección Central.” [Online]. Available: <https://www.isamex.org/intechmx/index.php/2018/12/24/conceptos-basicos-sistemas-de-control/>
- [32] K. Ogata, *Modern Control Engineering Fifth Edition*. IEEE, 2009.

- [33] G. S. E. Giraldo Buitrago Didier, *Teoria de control análogo*. Taller de publicaciones de la Universidad Tecnológica de Pereira Se, 2009.
- [34] L. Behera and I. Kar, *Intelligent Systems and Control Principles and Applications*. USA: Oxford University Press, Inc., 2010.
- [35] M. van Gerven and S. Bohte, “Editorial: Artificial neural networks as models of neural information processing,” 12 2017.
- [36] MathWorks, “Design model-reference neural controller in simulink,” 2020. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/deeplearning/ug/design-model-reference-neural-controller-in-simulink.html>
- [37] —, “Design narma-l2 neural controller in simulink,” 2020. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/deeplearning/ug/design-narma-l2-neural-controller-in-simulink.html>
- [38] L. A. Zadeh, “Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes,” *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1973.
- [39] —, “Fuzzy logic,” in *Computational Complexity: Theory, Techniques, and Applications*, 2013.
- [40] K. S. Fu and A. Rosenfeld, “Pattern Recognition and Image Processing,” *IEEE Transactions on Computers*, 1976.
- [41] E. A. Feigenbaum, “ART OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE - THEMES AND CASE STUDIES OF KNOWLEDGE ENGINEERING.” in *AFIPS Natl Comput Conf Expo Conf Proc*, 1978.
- [42] B. M. Al-hadithi, “Control Inteligente de Procesos,” no. January, 2014. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/259868806\\_CONTROL\\_INTELIGENTE\\_DE\\_PROCESOS](https://www.researchgate.net/publication/259868806_CONTROL_INTELIGENTE_DE_PROCESOS)
- [43] D. H. Nguyen and B. Widrow, “Neural networks for self-learning control systems,” *IEEE Control systems magazine*, vol. 10, no. 3, pp. 18–23, 1990.
- [44] M. Mitchell, J. H. Holland, and S. Forrest, “When will a Genetic Algorithm outperform Hill Climbing?” in *International Conference on Neural Information Processing Systems*, 1993.
- [45] K. Karabacak and N. Cetin, “Artificial neural networks for controlling wind–pv power systems: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pp. 804–827, 2014.



- [46] M. T. Haque and A. Kashtiban, “Application of neural networks in power systems; a review,” *International Journal of Energy and Power Engineering*, vol. 1, no. 6, pp. 897–901, 2007.
- [47] M. Mohanraj, S. Jayaraj, and C. Muraleedharan, “Applications of artificial neural networks for refrigeration, air-conditioning and heat pump systems—a review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 2, pp. 1340–1358, 2012.
- [48] O. Castillo and P. Melin, “A review on interval type-2 fuzzy logic applications in intelligent control,” *Information Sciences*, vol. 279, pp. 615–631, 2014.
- [49] T. Dang Huu and I. B. Ismail, “Modelling of Twin Rotor MIMO system,” *2016 2nd IEEE International Symposium on Robotics and Manufacturing Automation, ROMA 2016*, 2017.
- [50] A. N. Lopes, L. Arcese, K. Guelton, and A. Cherifi, “Sampled-data Controller Design with Application to the Quanser AERO 2-DOF Helicopter,” *2020 22nd IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics - THETA, AQTR 2020 - Proceedings*, pp. 0–5, 2020.
- [51] A. Ulasyar and H. S. Zad, “Robust & optimal model predictive controller design for twin rotor MIMO system,” *ELECO 2015 - 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, pp. 854–858, 2016.